

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-46-06>

УДК 004.771

**Озерчук Ігор Михайлович**, провідний науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0001-7011-0772>

Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

## ПРИНЦИПИ РЕАЛІЗАЦІЇ BLUETOOTH 5.2: АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ

**Озерчук І. М. Принципи реалізації Bluetooth 5.2: апаратна реалізація.** У статті розкрито принципи реалізації Bluetooth 5.2 з точки зору апаратної реалізації. Описано еволюцію технології Bluetooth, наведено інноваційні функції Bluetooth 5.2, визначено основні переваги. Розкрито механізм встановлення зв'язку та описано етапи реалізації останнього. Запропоновано алгоритм формування з'єднання точка-точка за технологією Bluetooth з детальним описом процесу. Охарактеризовано стек протоколів Bluetooth. Визначено функціональну приналежність кожного протоколу та описано принцип взаємодії між протоколами. Наголошується, що в умовах сьогодення, низка сучасних компаній інтегрували основні функції широкої смуги Bluetooth в апаратне забезпечення, інші компанії, надають інтерфейс керування хостом. Підкреслено, що система на основі ARM для реалізації Bluetooth передачі у своєму складі має низку додаткових компонентів з'єднаних поміж собою шиною даних. Схематично представлено взаємодію апаратного забезпечення Bluetooth з встановленням функціональних зв'язків. Обґрунтовано принцип реалізації шифрування даних (функція потокового шифру) в апаратному забезпеченні. Наголошується, що застосування функції потокового шифру в апаратному забезпеченні знімає безперервне навантаження з процесора по бездротовому каналу під час передачі даних, а реалізація механізму генерації ключів та аутентифікації в апаратному (а не програмному) забезпеченні призводить до швидшого часу підключення та мінімізації споживання енергії. Запропонована архітектура системи для реалізації апаратного забезпечення Bluetooth 5.2 з урахуванням функції крипто захисту, описано потоки зв'язків на базі системи та описано кожен наявний функціональний блок з відокремленням власної приналежності та виконуваних завдань. Описано широту спектру застосування Bluetooth 5.2 з виділенням таких сфер як: розумні пристрої; засоби масової інформації (телебачення, радіомовлення); подвійна трансляція (функція подвійної трансляції, допомагає у передачі ідентичної інформації через обладнання LE Audio та дубль через гарнітуру Bluetooth або відповідний мобільний додаток, це може значно заощадити час та енергію); багатомовний переклад у режимі реального часу (дана функція зручна при спілкуванні на різних мовах, чи прослуховуванні інформації різними мовами).

**Ключові слова:** реалізація, апаратне забезпечення, Bluetooth, передача даних, бездротове з'єднання, технологія, цифрова інформація, захист.

**Ozerchuk Ihor. Principles of Bluetooth implementation 5.2: hardware implementation.** The article reveals the principles of implementation of Bluetooth 5.2 in terms of hardware implementation. The evolution of Bluetooth technology is described, innovative features of Bluetooth 5.2 are given, the main advantages are defined. The mechanism of establishing communication is described and the stages of realization of the latter are described. An algorithm for forming a point-to-point connection using Bluetooth technology with a detailed description of the process is proposed. The stack of Bluetooth protocols is characterized. The functional affiliation of each protocol is determined and the principle of interaction between protocols is described. It is noted that in today's environment, a number of modern companies have integrated the basic functions of the broadband Bluetooth in the hardware, other companies provide a host management interface. It is emphasized that the ARM-based system for the implementation of Bluetooth transmission includes a number of additional components connected to each other by the data bus. The interaction of Bluetooth hardware with the establishment of functional connections is schematically presented. The principle of data encryption implementation (streaming cipher function) in hardware is substantiated. It is noted that the use of streaming cipher in hardware removes continuous load from the processor over the wireless channel during data transmission, and the implementation of the mechanism of key generation and authentication in hardware (rather than software) leads to faster connection time and minimizes power consumption. The proposed system architecture for the implementation of Bluetooth 5.2 hardware, taking into account the function of crypto security, describes the communication flows based on the system and describes each available functional unit with the separation of its own accessories and tasks. Describes the breadth of the range of applications of Bluetooth 5.2, highlighting such areas as: smart devices; mass media (television, radio broadcasting); dual broadcast (dual broadcast function, helps to transfer identical information via LE Audio equipment and duplicate via Bluetooth headset or corresponding mobile application, it can save a lot of time and energy); multilingual translation in real time (this feature is convenient when communicating in different languages or listening to information in different languages).

**Key words:** implementation, hardware, Bluetooth, data transfer, wireless connection, technology, digital information, security.

**Вступ та постановка завдання.** В основі поняття «Bluetooth», лежить технологія бездротової передачі даних на короткі відстані, яка може підключати кілька пристроїв одночасно для обміну цифровою інформацією. Головними перевагами технології є низька вартість, висока швидкість, зручне використання та низьке споживання енергії. Передача даних за технологією розширеного спектру зі стрибкоподібною зміною частоти має високу безпеку та здатність запобігати перешкодам, а також встановлює канали передачі даних для стаціонарних і мобільних пристроїв. Тому він широко використовується в мобільних телефонах, бездротових гарнітурах, ноутбуках, автомобілях та інших супутніх зовнішніх пристроях.

Фундаментальною основою реалізації технології Bluetooth є створення універсального радіоінтерфейсу для середовища зв'язку між різними пристроями, з метою подальшого поєднання технологій зв'язку з комп'ютерними технологіями та виконання передачі даних без кабелів. Таким чином, використовуючи технологію Bluetooth, можна встановити канал з'єднання між стаціонарними або мобільними пристроями в межах ефективного діапазону.

За роки свого існування Bluetooth з версії 1.0 дійшов до нового покоління зв'язку Bluetooth 5.2. Враховуючи попит на зв'язок та стрімкий розвиток інформаційних технологій Bluetooth, як окрема одиниця модернізувалася для вилучення або мінімізації тих недоліків, які з'явилися за роки існування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Формування наукової думки стосовно апаратної реалізації Bluetooth 5.2 ґрунтується на роботах як зарубіжних так і вітчизняних вчених.

О. Ю. Бочкар'єв, В. А. Голембо та Ю. А. Крайкін [1] розглянули проблему розроблення бездротової мережі сенсорних та виконавчих вузлів у складі кіберфізичної системи (КФС). Проаналізували способи реалізації схеми бездротового зв'язку. Запропонували структуру та алгоритми роботи мережі. Навели результати реалізації сенсорних та виконавчих вузлів мережі.

В.Б. Дудикевич, Г.В. Микитин, А.І. Ребець та М.В. Мельник [2] розглянули інформаційну безпеку сенсорних мереж Zigbee, Wi-Fi та Bluetooth згідно моделі OSI у просторі "рівень OSI – функції – протоколи" на основі концепції "об'єкт – загроза – захист" та нормативного забезпечення, які системно створюють підхід до побудови комплексних систем безпеки сенсорного безпроводного комунікаційного середовища (КС) кіберфізичних систем (КФС) за профілями конфіденційність – цілісність – доступність, що забезпечує безпечні процеси автоматизації об'єктів промислової інфраструктури України та інтеграції в міжнародний інтелектуальний простір.

В роботі [3] розглядається система вимірювання відстаней до об'єктів з bluetooth керуванням, призначена для полегшення та більш точного вимірювання відстані.

О.Д. Федій та Л.М. Божуха [4] запропонували підходи щодо формування стратегії обрання принципів архітектури мережі при проектуванні системи для подальшого розроблення технології усунення всіх можливих факторів, які впливають на визначення місця розташування з максимальною точністю. О. А. Суровцев та О. М. Павловський [5] здійснили порівняльний аналіз сучасних бездротових технологій обміну інформацією.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Pisharody, Sidharth & Kittali, Praveen & R, Suresh & Ravichandran, Shama & S, Aswin [6], Mohaghegh, Pooneh & Boegli, Alexis & Perriard, Yves [7], Liu, Chendong & Zhang, Yilin & Zhou, Huanyu [8], Căsar, Matthias & Pawelke, Tobias & Steffan, Jan & Terhorst, Gabriel [9], Salah, Khaled [10], Pérez Díaz de Cerio, David & Hernandez-Solana, Angela & Garcia-Lozano, Mario & Valdovinos, Antonio & Valenzuela, Jose-Luis [11], Villamor, Andrea & Melendi, David & Garcia, Roberto & García Pañeda, Xabiel & Pozueco, Laura & Corcoba Magaña, Víctor [12], Hadidjaja, D & Wisaksono, Arief & Ahfas, A & Syahririni, S & Untariningsih, D. [13], Gaitan, Nicoleta-Cristina & Ungurean, Ioan [14] Padiya, Sagar & Gulhane, Vijay [15], Stirparo, Pasquale & Loeschner, Jan [16] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання розкриття принципів реалізації Bluetooth 5.2 залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Розкрити принципи реалізації Bluetooth 5.2: апаратна реалізація.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Стартовою точкою у розробці Bluetooth була спроба зробити бездротові навушники в основі роботи яких була бездротова передача звуку. Започаткував дану спробу Ericsson у 1998 році. Технологія постійно вдосконалювалася та вийшла на новий рівень – масштабовану передачу даних між пристроями.

Процес підключення та ініціалізації Bluetooth здійснюється у п'ять етапів.

Перший етап: головний пристрій ініціює запит на підключення шляхом стрибкоподібної зміни частоти.

Другий етап: пристрій, який є підпорядкованим отримує повідомлення від головного вузла, та повідомить верхній рівень, щоб отримати інформацію про з'єднання, а підлеглий вузол, в свою чергу, поверне кадр прийняття з'єднання або кадр відхилення посилання.

Третій етап: у випадку коли при моніторингу запитів підпорядкованому пристрою потрібна зміна ролі, останній надсилає інформацію про відхилення часу і кадр запиту перемикання.

Четвертий етап умовно ділиться на два під етапи:

якщо підпорядкований пристрій приймає запит на підключення головного пристрою, починається процес шифрування Bluetooth, а у випадку, якщо запиту на шифрування немає, головний пристрій надішле повідомлення про завершення з'єднання.

якщо підпорядкований пристрій відхиляє запит на з'єднання, він надсилає кадр роз'єднання.

П'ятий етап – це підтвердження з'єднання, коли два пристрої успішно підключено.

За мови, що два пристрої підключені один до одного та обмін функціями пройшов успішно, хост починає налаштовувати адаптивну стрибкоподібну перестройку частоти. Якщо є авторизація налаштування, хост запитує ключ посилення з верхнього рівня. Якщо для з'єднання потрібна авторизація, але ключ посилення не існує, його потрібно об'єднати в пару для створення ключа посилення. Після успішної авторизації та створення пари почнеться шифрування посилення та встановлення підключення буде завершено.

На рисунку 1 наведено алгоритм формування з'єднання точка-точка за технологією Bluetooth.

У рамках реалізації технології Bluetooth діють низка протоколів, кожен з яких відповідає за свій спектр роботи. У загальному розумінні стек протоколів Bluetooth в основному розділений на три рівні. Рівень додатків – це прикладний рівень, середній рівень – це рівень хосту, включаючи загальні профілі доступу (GAT), протокол менеджера безпеки (SMP), загальний профіль атрибутів (GATT), протокол атрибутів (ATT) і керування та адаптації логічного зв'язку (L2CAP). Третій рівень – це рівень керування, включаючи інтерфейс керування хостом (HCL), каналний рівень (LL) і фізичний рівень (PHY). Нижній шар надає послуги верхньому шару шляхом переходу знизу вгору.

Протокол атрибутів в основному визначає параметри атрибутів різних служб, які використовуються для обміну інформацією та узгодження між ведучим і підпорядкованим пристроями. Протокол керування та адаптації логічного зв'язку розбиває та збирає верхні дані, щоб відповідати можливостям контролера. Розширений протокол атрибутів у Bluetooth 5.2 є вдосконаленням протоколу атрибутів, яке може обробляти одночасні транзакції та додає контроль потоку для підвищення стабільності розширеного протоколу атрибутів. Іншими словами, розширений протокол атрибутів дозволяє різним програмам виконуватися одночасно на різних каналах протоколу керування та адаптації логічного зв'язку. А розмір максимального блоку передачі (MTU) протоколу атрибутів дозволяється змінювати під час підключення.

Протокол атрибутів виконується послідовно, при цьому може бути виконана тільки одна транзакція. Хоча розширений протокол атрибутів може виконувати кілька подій одночасно між клієнтом і сервером Bluetooth це технологія з низьким споживанням енергії. Таким чином, основні переваги розширеного протоколу атрибутів на базі Bluetooth включають зручність, гнучкість і більш високу швидкість обробки, що значно покращує процес і затримку багаторазового доступу до стека і добре відповідає очікуванням усунення вразливостей безпеки.



Рисунок 1 – Алгоритм формування з'єднання точка-точка за технологією Bluetooth

Нововведенням у Bluetooth 5.2 стало додавання функції керування живленням, робота функції спрямована на балансування якості сигналу та потужності, а також зниження споживання енергії.

Bluetooth 5.2 також інтегрує функцію двонаправленого керування потужністю Bluetooth. Приймач Bluetooth з низьким енергоспоживанням може стежити за потужністю сигналу головного пристрою та запитувати зміну потужності передачі, основною метою даного інноваційного доповнення є балансування якості та потужності сигналу. Коли головний пристрій завжди передає сигнали високої інтенсивності, зв'язок приймального пристрою вийде з ладу, а потужність терміналу передачі буде використано даремно. Навпаки, коли потужність сигналу занадто низька, частота помилок приймального обладнання занадто висока, що призводить до збою передачі.

Функція контролю енергоспоживання дозволяє контролеру Bluetooth використовувати концепцію «області» для моніторингу зміни втрат на шляху і повідомляти про це хосту Bluetooth. Нарешті, ця функція також може покращити співіснування інших бездротових пристроїв у частотному діапазоні 2,4 ГГц.

Bluetooth 5.2 може реалізувати динамічне управління потужністю передачі сигналу. Головний пристрій отримує сповіщення про зміну живлення, виявляючи силу сигналу іншої сторони. У порівнянні з обладнанням, відстань якого часто змінюється, головний вузол заощаджує споживання електроенергії та може відповідним чином змінювати потужність, щоб приховати вимоги до застосування. Користувач також може самостійно змінювати потужність передачі та надсилати інструкцію зміни до підпорядкованого пристрою. Перевагою функції контролю енергоспоживання є ефективне використання енергії акумулятора. У сфері датчиків із батареєю, як і в багатьох програмах, що існують в Інтернеті речей і розумних будинках, нова продуктивність Bluetooth 5.2 з низьким енергоспоживанням дозволяє динамічно оптимізувати термін служби батареї, мінімізуючи потребу в обслуговуванні електроенергії, тим самим значно знижуючи витрати.

Bluetooth 5.2 інтегрує ізохронний канал для реалізації наступного покоління Bluetooth LE. Він визначає залежний від часу канал передачі даних і стратегію передачі. Тим самим гарантуючи,

що дані, отримані одержувачем, відповідають заявленим вимогам. Це дозволяє передавати обмежені в часі дані на один або кілька пристроїв для синхронізації часу.

Bluetooth LE приймає новий комунікаційний код з низькою складністю. У порівнянні зі старим кодуванням, він має характеристики хорошої якості звуку та низького споживання енергії.

У минулому підтримувалися лише орієнтовані на з'єднання асинхронні лінії зв'язку та ширококомовні канали у відключеному режимі. Bluetooth 5.2 підтримує синхронний канал передачі аудіопотоку в підключеному режимі і синхронний канал передачі аудіопотоку в розключеному режимі.

Багато сучасних компаній інтегрували основні функції широкої смуги Bluetooth в апаратне забезпечення. Інші компанії, надають інтерфейс керування хостом, яким можна керувати, наприклад, через інтерфейс USB. Вбудований процесор ARM для виконання відповідного мікропрограмного забезпечення підтримує апаратні компоненти контролера Bluetooth.

Щоб система на основі ARM (рисунок 2) працювала належним чином, їй зазвичай потрібно багато блоків RAM і ROM, кеш-пам'ять інструкцій і складна логіка керування. З іншого боку, апаратні реалізації обмежують кремнієву область і споживають менше енергії чіпа. Крім того, реалізація програмного забезпечення вимагає множення інструкцій і більшої кількості тактів для виконання часткової операції, що знижує продуктивність системного часу.

Основна смуга Bluetooth

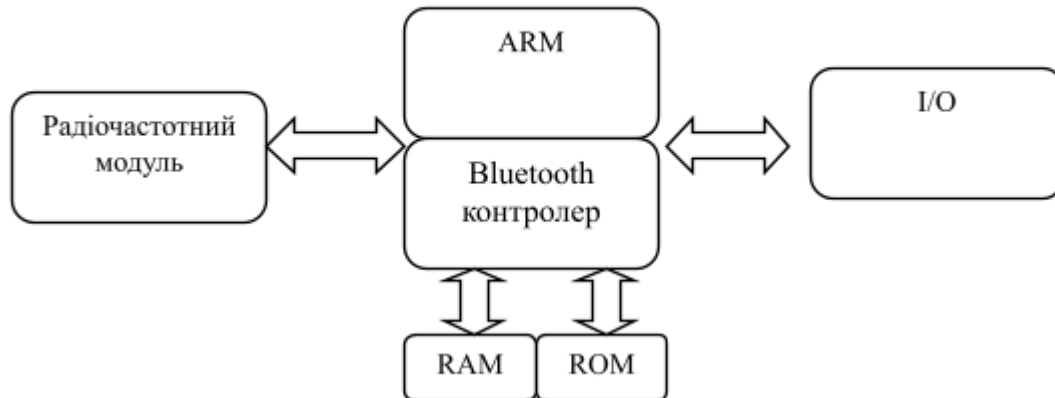


Рисунок 2 – Схема взаємодії апаратного забезпечення Bluetooth

Більшість однокристальних реалізацій базової смуги Bluetooth реалізують шифрування даних (функція потокового шифру) в апаратному забезпеченні. Це знімає безперервне навантаження з процесора по бездротовому каналу під час передачі даних. Крім того, реалізація механізму генерації ключів та аутентифікації в апаратному (а не програмному) забезпеченні призводить до швидшого часу підключення та меншого споживання енергії. На рисунку 3 показана запропонована архітектура системи для реалізації апаратного забезпечення Bluetooth 5.2 з урахуванням функції криптозахисту, яка є обов'язковою в умовах сьогодення.

Архітектура складається з шести підрозділів:

- функція генерації ключа посилання;
- функція E1/E3 (аутентифікація та генерація ключа шифрування);
- пам'ять RAM і ROM;
- функція потокового шифру;
- контроль;
- інтерфейс введення/виведення.

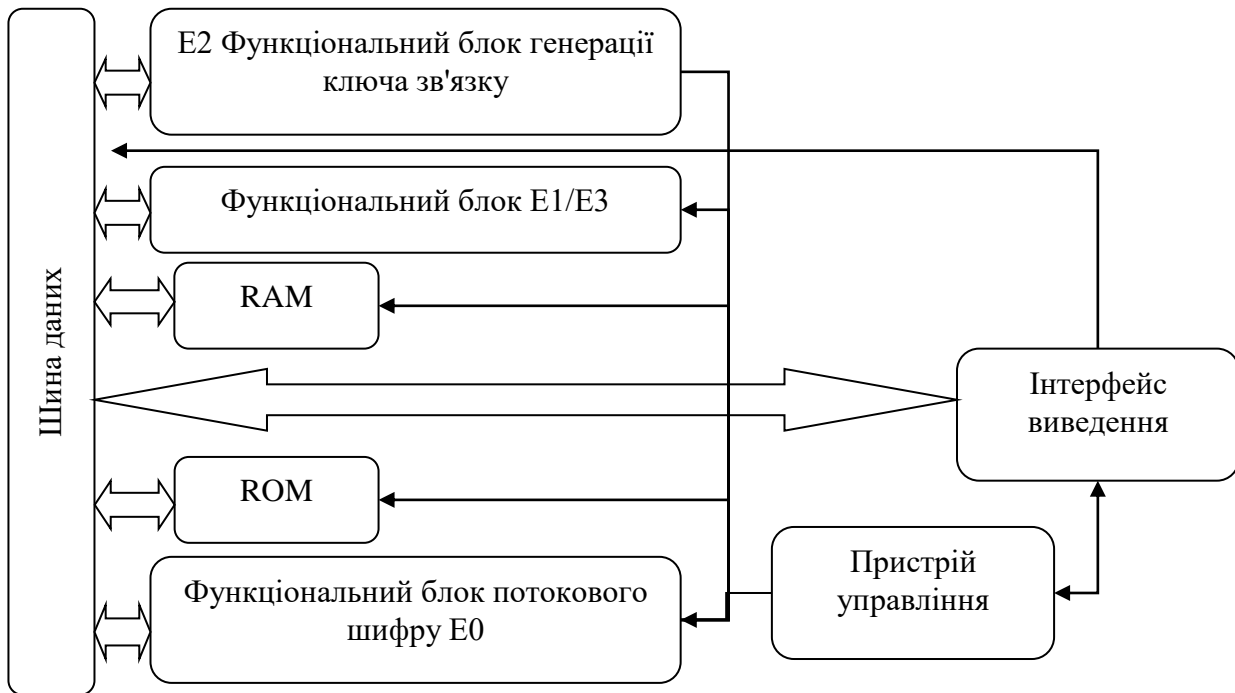


Рисунок 3 – Архітектура системи для реалізації апаратного забезпечення Bluetooth 5.2 з урахуванням функції криптозахисту

Функціональний блок генерації ключа послань розробляє відповідні ключі послань. Використовуючи ці ключі послань, функціональний блок E1/E3 виконує аутентифікацію та надає ключ шифрування. Він використовує функціональний блок потокового шифрування для шифрування даних і передає всі міжблокові переміщення даних через 64-бітну шину даних. Він також інтегрує RAM для зберігання відповідних функціональних клавш і зберігає функціональні константи в ROM. Блок управління синхронізує роботу системи та переводить неактивні частини системи в режим очікування. Це значно зменшує розсіювання потужності. Система зв'язується із зовнішнім середовищем через інтерфейс введення/виводу.

Основним компонентом усіх функцій генерації ключів (E2, E3) та функції аутентифікації є алгоритм заснований на існуючому сімействі шифрів Safer, яке включає комплексні шифри. Усі алгоритми є байто-орієнтованими алгоритмами блочного шифрування, які мають дві властивості. По-перше, для досягнення бажаної дифузії вони використовують неортодоксальне лінійне перетворення (псевдо-Адамара). По-друге, вони використовують адитивні постійні коефіцієнти (вектори зміщення) у плануванні ключів, щоб уникнути слабких ключів.

Bluetooth 5.2 має широкий спектр застосувань у повсякденному житті. Забезпечуючи низьке енергоспоживання, він також може забезпечити високу якість обслуговування. Наприклад, розумні пристрої, громадське телебачення, допоміжна приймальня, багатомовний переклад у реальному часі тощо.

1) розумні пристрої

Враховуючи функцію Bluetooth низьке енергоспоживання багато розумних пристроїв покладаються на технологію Bluetooth для обміну даними, що знижує енергоспоживання.

2) Громадське телебачення

Функція аудіо Bluetooth дає можливість зменшити шумові перешкоди за рахунок доступу до розподіленого сприймання звуків.

3) Подвійна трансляція

Функція подвійної трансляції, допомагає у передачі ідентичної інформації через обладнання LE Audio та дубль через гарнітуру Bluetooth або відповідний мобільний додаток, це може значно заощадити час та енергію.

4) Багатомовний переклад у режимі реального часу

Дана функція зручна при спілкуванні на різних мовах, чи прослуховуванні інформації різними мовами.

**Висновки.** У роботі розкрито принципи реалізації Bluetooth 5.2: апаратна реалізація. Bluetooth 5.2 реалізує динамічне управління потужністю передачі сигналу, має функцію низького енергоспоживання, дозволяє динамічно оптимізувати термін служби батареї, мінімізуючи потребу в обслуговуванні електроенергії, тим самим значно знижуючи витрати. Bluetooth з різними пристроями можуть працювати разом через спеціальні мережі, вказуючи на початок стандарту, що забезпечує бездротовий зв'язок між машиною комунікації та між кожним інтелектуальним пристроєм і приладом. Архітектура системи для реалізації апаратного забезпечення Bluetooth 5.2 з урахуванням функції крипто захисту ґрунтується на використанні малопотужного мікропроцесору, який відіграє значну роль у реалізації безпеки для рішень Bluetooth.

Перспективами подальших досліджень є структуризація наукових надбань, виділення переваг та недоліків розроблених версій Bluetooth з метою узагальнення отриманого досвіду та подальших інноваційних рішень.

#### Список бібліографічного опису.

1. Бочкар'єв О.Ю., Голембо В.А., Крайкін Ю.А., Бездротова мережа сенсорних та виконавчих вузлів у складі кіберфізичної системи // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі», № 881, 2017. С.15-24
2. Микитин Г. В. Безпроводні сенсорні мережі ZigBee, Wi-Fi та Bluetooth в кіберфізичних системах: концепція "об'єкт – загроза – захист" на основі моделі OSI / В. Б. Дудикевич, Г. В. Микитин, А. І. Ребець, М. В. Мельник // Системи обробки інформації, 2019. С. 114–120.
3. Швайка О.О. Розробка системи вимірювання відстаней до об'єктів з Bluetooth керуванням / О.О. Швайка, Т.М. Дубовик // Матеріали Десятої Міжнародної наукової конференції студентів та молодих вчених «Сучасні інформаційні технології - 2020» «Modern Information Technology - 2020» (14-15 травня 2020 р., м.Одеса) / МОН України; Одес. Нац. політех. ун-т; Ін-т комп'ют. систем. – Одеса : Наука і техніка, 2020. С. 207-209.
4. Федій О. Д., Божуха Л. М. Про підходи визначення місцезнаходження об'єктів // Математичне моделювання в природничих науках та інформаційні технології: Математичне моделювання, 2021. № 2(45). С. 40-47.
5. Суровцев О. А. Порівняння сучасних бездротових технологій обміну інформацією / О. А. Суровцев О. М. Павловський // XI всеукраїнська науково-практична конференція студентів та аспірантів «ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ», 15-16 травня 2018 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна, 2018. С. 64-66.

#### References.

1. Pisharody, Sidharth & Kittali, Praveen & R, Suresh & Ravichandran, Shama & S, Aswin. (2021). Design and Implementation of Bluetooth Controlled Weeder. 1700-1705. 10.1109/I-SMAC52330.2021.9640936.
2. Mohaghegh, Pooneh & Boegli, Alexis & Perriard, Yves. (2021). Bluetooth Low Energy Direction Finding Principle. 830-834. 10.23919/ICEMS52562.2021.9634353.
3. Liu, Chendong & Zhang, Yilin & Zhou, Huanyu. (2021). A Comprehensive Study of Bluetooth Low Energy. Journal of Physics: Conference Series. 2093. 012021. 10.1088/1742-6596/2093/1/012021.
4. Căsar, Matthias & Pawelke, Tobias & Steffan, Jan & Terhorst, Gabriel. (2022). A survey on Bluetooth Low Energy security and privacy. Computer Networks. 205. 108712. 10.1016/j.comnet.2021.108712.
5. Salah, Khaled. (2022). An Introduction to Bluetooth. 10.1007/978-3-030-88626-4\_1.
6. Pérez Díaz de Cerio, David & Hernandez-Solana, Angela & Garcia-Lozano, Mario & Valdovinos, Antonio & Valenzuela, Jose-Luis. (2021). Speeding Up Bluetooth Mesh. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2021.3093102.
7. Villamor, Andrea & Melendi, David & Garcia, Roberto & García Pañeda, Xabiel & Pozueco, Laura & Corcoba Magaña, Víctor. (2022). Bluetooth 5 performance analysis for inter-vehicular communications. Wireless Networks. 28. 10.1007/s11276-021-02830-9.
8. Hadidjaja, D & Wisaksono, Arief & Ahfas, A & Syahririni, S & Untariningsih, D. (2021). Bluetooth implementation on automation of Android-based gate doors. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1098. 042061. 10.1088/1757-899X/1098/4/042061.
9. Gaitan, Nicoleta-Cristina & Ungurean, Ioan. (2021). BACnet Application Layer over Bluetooth—Implementation and Validation. Sensors. 21. 538. 10.3390/s21020538.
10. Padiya, Sagar & Gulhane, Vijay. (2022). Analysis of Bluetooth Versions (4.0, 4.2, 5, 5.1, and 5.2) for IoT Applications. 10.4018/978-1-7998-6988-7.ch010.
11. Stirparo, Pasquale & Loeschner, Jan. (2013). Secure Bluetooth for Trusted m-Commerce. Int'l J. of Communications, Network and System Sciences. 6. 277. 10.4236/ijcns.2013.66030.